

УДК 681.5.015

© 2018 г. **В.В. Климченко**<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
**С.А. Самотылова**<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,  
<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССООБМЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ НЕИЗВЕСТНОМ ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫХОДНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ\*

Рассматривается задача оценки параметров модели, прогнозирующей показатель качества выходного продукта массообменного технологического процесса в условиях неизвестного времени измерения выходной переменной. Предлагается процедура оценки, минимизирующая сумму квадратов «невязок», причем под невязкой понимается евклидово расстояние от результата измерения выходной переменной до множества значений, принимаемых выходом модели в течение соответствующего интервала времени. Показано, что предлагаемый подход повышает точность прогнозирующей модели.

**Ключевые слова:** прогнозирующая модель, неизвестное время измерения, показатель качества, массообменный технологический процесс, идентификация.

DOI: 10.22250/isu.2018.58.46-51

### Введение

В настоящее время для управления массообменными технологическими процессами (МТП) и контроля качества их выходных продуктов широкое распространение получили прогнозирующие модели – виртуальные анализаторы (ВА) [1]. Они представляют собой математические модели, связывающие показатели качества выходного продукта с оперативно измеряемыми технологическими параметрами (давление, температура, расход) [2]. Необходимость использования виртуальных анализов обусловлена неизбежными задержками предоставления данных заводских лабораторий, требующего дополнительных затрат времени для

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-07-00235 А).

лабораторного анализа качества производимой продукции [3]. Для построения прогнозирующих моделей зачастую используются регрессионные методы [4, 5].

Качество прогнозирующей модели сильно зависит от используемых данных. В практических случаях основной проблемой построения прогнозирующей модели является неизвестное на определенном интервале время измерения выходной переменной [6]. Неизвестное время измерения выходной переменной в процессе идентификации массообменного технологического процесса приводит к проблеме перепараметризации, к получению плохо обусловленной матрицы и т.д. [7]. Кроме того, многомерные регуляторы, разработанные на основе прогнозирующей модели процесса с неточным временем измерения, не соответствуют требованиям к производительности системы управления или могут сделать систему замкнутого контура нестабильной. Также проблема неизвестного времени измерения на определенном интервале приводит к невозможности использовать известные методы предсказательного моделирования. Таким образом, разработка алгоритма, учитывающего неизвестное время измерения выходной переменной, является актуальной задачей при построении виртуальных анализаторов.

Задачи идентификации МТП при неизвестном времени измерения выходной переменной привлекли к себе большое внимание в последние годы [3, 8, 9]. Общими методами идентификации МТП при неточном времени измерения выходной переменной являются непараметрические методы. Широкое распространение получили методы на основе EM (Expectation-Maximization) алгоритма, который представляет собой итеративный метод для нахождения оценок максимального правдоподобия [6, 10]. Важнейшим недостатком данного алгоритма является то, что в ряде ситуаций он выбирает локальный максимум, ближайший к начальному приближению.

Подход, рассматриваемый в данной статье, позволяет избежать подобных недостатков. Предлагается процедура оценки, минимизирующая сумму квадратов «невязок», причем под невязкой понимается евклидово расстояние от результата измерения выходной переменной до множества значений, принимаемых выходом модели в течение соответствующего интервала времени.

### **Описание технологического процесса**

Технологическая схема массообменного технологического объекта (МТО), являющегося ректификационной колонной производства метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ), представлена на рис. 1.

В качестве сырья в колонну подается реакционная смесь с прямогочного реактора форконтакта ( $PC_{pф}$ ) и реакционная смесь с реактора синтеза МТБЭ ( $PC_{PC}$ ). Реакционная смесь из реактора синтеза выводится двумя потоками: сверху

реактора отбирается газовая фаза, снизу реактора – жидкая фаза, каждая из которых идет на дальнейшее разделение.

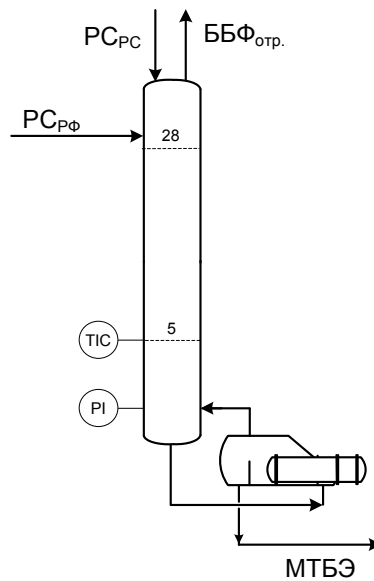


Рис. 1. Технологическая схема синтеза МТБЭ.

Критерием качества выходного продукта МТБЭ является содержание метанола (MeOH) в МТБЭ. Для построения модели, предсказывающей содержание MeOH в выходном продукте, в качестве регрессоров использовались измеряемые технологические параметры: температура на 5-й тарелке ректификационной колонны (ТЭС) и давление куба колонны (PI).

В реальных условиях при идентификации подобных объектов возникают трудности, связанные как с неизвестным временем измерения выходной переменной, так и с воздействием случайных внешних и внутренних факторов. Неизвестность времени измерения выходной переменной обычно обусловлена длительностью лабораторных анализов.

### Постановка задачи

Исходными данными являются результаты измерений характеристик МТП, представленные в виде трехмерного временного ряда

$$X(1), X(2), \dots, X(N), \quad (1)$$

где  $X(k) = (x_1(t_k) \ x_2(k) \ x_3(k))^T$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ ;  $x_1(t_k)$  – концентрация (массовая доля) метанола в МТБЭ в момент времени  $t_k$ ;  $x_2(k)$  – температура на пятой тарелке ректификационной колонны (ТЭС) во время  $k$ -го измерения;  $x_3(k)$  – давление куба колонны (PI) в момент  $k$ -го измерения; верхний индекс  $T$  – операция транспонирования.

Модель МТО имеет следующий вид:

$$x_1(t_k) = a_0 + a_1x_2(k - \tau_1) + a_2x_3(k - \tau_2) + e(k), \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где  $\tau_1, \tau_2$  – задержки влияния соответствующих входных переменных  $x_2, x_3$  на выходную переменную  $x_1$ , определяемые применяемой технологией;  $e(k)$  – ошибка прогноза выхода  $x_1(t_k)$ , вычисленного на основании данной модели в момент времени  $t = k - \min\{\tau_1, \tau_2\}$ .

Требуется оценить  $A = (a_0 \ a_1 \ a_2)^T$  – вектор коэффициентов модели (2).

Истинное время измерения выходной переменной  $x_1(t_k)$  неизвестно, известны лишь границы  $t_{ak}, t_{bk}$  интервала, содержащего момент времени  $t_k$ :  $t_k \in [t_{ak}, t_{bk}]$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ .

### Идентификация технологического объекта

Условие неизвестности времени измерения выходного параметра  $x_1$  не позволяет воспользоваться методом наименьших квадратов (МНК) для оценки компонент вектора  $A$ . В данной статье предлагается процедура, применяющая МНК в измененном виде. Для оценки  $\tilde{A} = (\tilde{a}_0 \ \tilde{a}_1 \ \tilde{a}_2)^T$  вектора  $A = (a_0 \ a_1 \ a_2)^T$  используется формула

$$\tilde{A} = (\tilde{a}_0 \ \tilde{a}_1 \ \tilde{a}_2)^T = \arg \min_{a_0, a_1, a_2} \sum_{k=1}^N \tilde{e}_k^2(a_0 \ a_1 \ a_2), \quad (3)$$

$$\tilde{e}_k(a_0 \ a_1 \ a_2) = \min_{t_k \in [t_{ak}, t_{bk}]} \{x_1(t_k) - a_0 - a_1 x_2(k - \tau_1) - a_2 x_3(k - \tau_2)\}. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что при достаточно больших значениях  $N$  и  $t_{bk} - t_{ak}$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$  предлагаемая процедура идентификации может оказаться весьма трудоемкой. В подобных случаях объем вычислений может быть снижен путем уменьшения количества точек в интервалах  $[t_{ak}, t_{bk}]$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ . Для этого временной ряд (1) должен быть предварительно профильтрован при помощи низкочастотного фильтра. Затем, после удаления высокочастотных флюктуаций, интервал дискретизации по времени может быть увеличен.

### Оценка параметров процесса синтеза метил-трет-бутилового эфира

Временной ряд (1), использовавшийся при расчетах, состоял из результатов  $N = 57$  измерений. Выборка данных была разделена на обучающую ( $N_1 = 38$  измерений) и проверочную ( $N_2 = 19$  измерений) части.

Оценка  $\tilde{A}$  для вектора  $A$ , вычисленная по формуле (3), составила  $\tilde{A} = (38,09 \ -33,85 \ -0,10)^T$ . Для сравнения была вычислена оценка  $\hat{A}$  того же вектора методом наименьших квадратов, при этом под временем измерения выходной переменной подразумевалась середина соответствующего интервала:  $t_k = 0,5(t_{bk} - t_{ak})$ . МНК-оценка оказалась равной  $\hat{A} = (5,39 \ -1,57 \ -0,03)^T$ . Среднеквадратическая ошибка (СКО) прогнозов выходной переменной, вычисленных на про-

верочной выборке с коэффициентами  $\tilde{A}$ , составила 0,0213. При использовании оценки  $\hat{A}$  эта величина оказалась равна 0,0131. Таким образом, предлагаемая процедура снизила СКО прогнозов на  $(0,0213 - 0,0131)/0,0213 = 0,3850 \approx 38,5 \%$ . Такое большое различие объясняется тем, что на проверочной выборке ошибки прогнозов вычислялись по формуле (4), использовавшейся для вычисления оценок  $\tilde{A}$ . С этой точки зрения особый интерес представляет сравнение прогнозов на проверочной выборке по критерию МНК. В этом случае СКО прогнозов, вычисленных по модели с коэффициентами  $\hat{A}$ , оказалась равна 0,0235, тогда как коэффициенты  $\tilde{A}$  привели к СКО, равной 0,0201. Уменьшение СКО, достигнутое за счет применения предлагаемой процедуры идентификации, составило  $(0,0235 - 0,0201)/0,0235 = 0,1447 \approx 14,5 \%$ .

### Заключение

Представленная процедура идентификации МТП, в отличие от поиска оценок максимального правдоподобия, не требует задания закона распределения времени измерения показателя качества выходного продукта, который в практических ситуациях бывает известен далеко не всегда. Однако предлагаемый подход все-таки допускает некоторую интерпретацию в вероятностных категориях, если неизвестное время каждого измерения подчинено равномерному закону распределения вероятностей в соответствующем интервале. Такое предположение может оказаться оправданным, если нет оснований априори отдать предпочтение каким-либо значениям из этого интервала времени. При минимаксном подходе (рассчитывающем на наихудший случай) неизвестное распределение часто заменяется равномерным как наименее информативным в смысле того или иного критерия [11].

В то же время приходится признать, что в тех случаях, когда закон распределения вероятностей времени измерения известен, можно ожидать, что оценки максимального правдоподобия окажутся более эффективными.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Olanrewaju M.J., Huang B., Afacan A.* Online composition estimation and experiment validation of distillation processes with switching dynamics // *Chemical engineering science*. – 2010. – Vol. 65, Issue 5. – P. 1597-1608.
2. *Дуго Г.Б., Дуго Н.Б., Козлов А.В., Самотылова С.А., Торгашов А.Ю.* Структурно-параметрическая идентификация моделей виртуальных анализаторов технологических объектов управления на основе робастной регрессии и информационных критериев // *Автоматизация в промышленности*. – 2015. – №10. – С. 58-62 (2).
3. *Liu X., Yang X., Xiong W.* A robust global approach for LPV FIR model identification with time-varying time delays // *Journal of the Franklin Institute*. – 2018. – Vol. 355, No 15. – P. 7401-7416.

4. *Ngo S.H., Kemeny S., Deak A.* Performance of the ridge regression method as applied to complex linear and nonlinear models // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. – 2003. – Vol. 67. – P. 69-78.
5. *Yan X.* Modified nonlinear generalized ridge regression and its application to develop naphtha cut point soft sensor // *Computers and Chemical Engineering*. – 2008. – Vol. 32. – P. 608-621.
6. *Xie Li, Yang H. Huang B.* FIR model identification of multirate processes with random delay using EM algorithm // *AIChE Journal*. – 2013. P. 1-41.
7. *Xiong W., Yang X., Huang B., Xu B.* Multiple-model based linear parameter varying time-delay system identification with missing output data using an expectation-maximization algorithm // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2014. Vol. 53. – P. 11074-11083.
8. *Chen J., Ma J., Liu Y., Ding F.* Identification methods for time-delay systems based on the redundant rules // *Signal Processing*. – 2017. – Vol. 137. – P. 192-198.
9. *Yang X., Xiong W., Wang Z., Liu X.* Parameter identification of nonlinear multirate time-delay system with uncertain output delays // *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. – 2017. – Vol. 40, No 12. – P. 3498-3506.
10. *Zhou Xi-Yu, Lim Joon S.* Replace missing values with EM algorithm based on GMM and Naïve Bayesian // *International Journal of Software Engineering and Its Applications*. – 2014. – Vol. 8, No 5. – P.177-188.
11. *Репин В.Г., Тартаковский Г.П.* Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. – М.: Советское радио, 1977.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.*

*E-mail:*

*Климченко Владимир Владимирович – volk@iacp.dvo.ru;*

*Самотылова Светлана Александровна – samotylova@dvo.ru.*